

우리나라 5대 하천 본류에서의 하천유량과 수질의 상관 특성 검토

우 효섭¹⁾, 김 연주²⁾, 이 진원³⁾

1. 서론

최근 도시의 산업화와 인구밀도 증가에 따른 오염물질 배출의 증가로 인해 하천수의 수질은 날로 저하되어 물의 효율적인 이용이 매우 어렵게 되었다. 특히 우리나라 5대강은 상수원수로 이용될 뿐만 아니라 공업용수와 농업용수로서의 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 상수원으로 이용되는 일부 하천수의 오염증가로 인하여 수질 문제를 야기하고 수도물의 불신을 증폭시키는 결과를 초래하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 종합적인 유역 물오염 방지대책이 필요하며, 이를 위해서는 무엇보다도 하천 수계내에 토지 이용에 따른 오염물질 부하량 변화와 유출량 변화에 따른 수질변화의 조사가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 우리나라 하천에 있어서의 유량과 수질의 상관 특성을 검토하기 위하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 등 5대 수계의 상·하류 각 1지점에 대해 1990년 1월부터 1993년 12월까지 수질측정 자료와 그에 대응하는 유량자료를 수집하였다. 수집된 자료를 이용하여 수질항목별 1:1 Pearson 분석을 수행하였으며, 유량과 수질과의 상관성을 조사하기 위하여 단순회귀분석, 다중회귀분석과 자기회귀분석을 수행하였다.

2. 자료의 수집

본 분석에 이용된 자료는 1990년 1월부터 1993년 12월까지 4년간의 자료로서, 각 수계별 상·하류 한 지점씩 모두 10개 지점에 대해 측정된 수질자료와 측정일에 해당하는 유량자료이다. 조사 수계 및 지점의 위치는 그림 1에 나타나 있다.

2.1 수질자료

BOD, COD, SS 등 10개 항목에 대해 환경청 지청에서 측정한 자료를 수집하였다. 수질자료의 수집시 수질측정일을 확인하여 나중에 그 날짜에 해당하는 하천유량을 산정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 이용된 수질자료를 1990년부터 1993년까지의 4년간 자료로 제한한 것은 이 기간 동안의 수질자료만이 측정일자가 기록된 원장이 남아 있기 때문이다. 즉, 수질측정기관에서 자료보관을 5년으로 제한하기 때문에 1989년 이전 자료에 대해서는 단지 월평균 수질 자료만 남기고 측정일이 표시된 원장은 남아 있지 않은 실정이다.

더구나, 1990년부터 1993년까지의 수질자료는 월별로 하루에서 나흘까지의 수질측정 일자가 기록되어있으나, 수질자료 자체는 일 측정치의 월평균값으로만 보고되고 있다. 또한 홍수시에는 하루동안에도 하천유량이 수배 이상 변하므로 날짜만 가지고는 동시자료라 하기 어렵다. 이러한 점에서 본 연구에서 필요한 유량과 수질의 동시자료는 지난 4년간만 존재할 뿐더러, 그나마 완전한 의미의 동시자료라 하기 어렵다.

- 1) 한국건설기술연구원 수자원연구실 실장
- 2) 한국건설기술연구원 수자원연구실 위촉연구원
- 3) 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

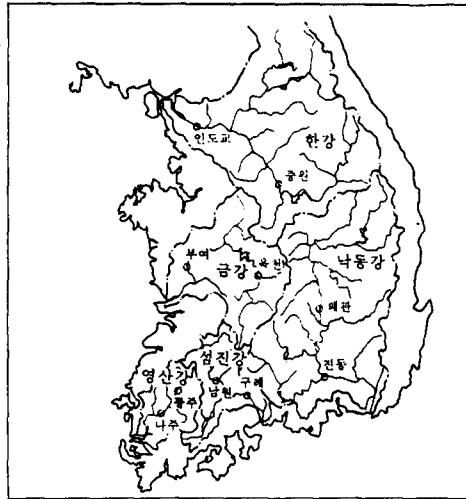


그림 1 조사 수계 및 지점의 위치

2.2 유량자료

지점별 수질측정일에 해당하는 하천유량은 해당 지점에 일수위자료와 수위-유량관계가 있는 경우 이를 이용하였다. 한강의 인도교, 낙동강의 왜관과 진동, 섬진강의 송정, 영산강의 나주지점 등이 이에 해당한다. 수질측정지점에 유량자료가 가용하지 않은 경우 상하류의 신뢰도 높은 수위관측지점의 유량자료를 이용하여 면적비로 추정하였다.

또한, 월 2회 이상 수질이 측정된 경우 측정일은 있어도 수질자료는 월평균자료만 가용하기 때문에 유량도 측정일의 유량을 월평균하여 1:1 대응시켰다. 즉 어느 한 지점의 수질자료가 월 1회 측정된 것이면 그 날에 해당하는 유량자료를 이용하였고, 월 4회 측정된 것이면 각일에 해당하는 유량을 평균하여 그 달의 수질자료에 대응하는 유량자료로 이용하였다.

한편, 유량과 수질과의 상관성 분석시 호우에 의해 유역 비점오염원의 유입 및 무단방류 등으로 일시적으로 수질이 악화되는 경우를 제외시키기 위해 수질측정지점의 상류유역에 대해 수질측정일을 기준으로 2일전까지 모두 3일동안의 강수량을 수집하였다. 강수량 자료는 기상청 자료를 이용하였으며, 유역평균을 위해서는 단순히 지점강수량을 산술평균하였다.

3. 수질지표간 상관성 검토

먼저 수질지표간의 상관성을 검토하기 위하여 Pearson 상관분석을 수행하였다. 그 결과 5대강의 10개 지점에서 공통적으로 BOD는 COD와 대체적으로 비례 상관관계를 나타냈다. 이러한 결과는 충분히 예상된 것이다. 그러나 다른 수질항목간의 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았다.

4. 유량과 수질의 상관성 검토

4.1 단순회귀분석

5대 수계의 각 지점에 대한 유량자료와 수질인자들의 상관관계를 검토하였다. 검토 대상 수질인자들은 BOD, COD, DO, pH, 대장균, 총질소, 총인, SS 등 8개 항목들이었다. 수질과 유량의 상관성은 선형-대수형 (linear-log) 관계로 묘사하였다.

한편, 유량과 수질과의 상관성 검토에서 수질측정 전일의 강우 영향을 제거하기 위하여 누가강

우량을 고려하여 5 mm 이상 강우의 영향을 받은 수질자료점들을 제외시켰다. 이렇게 선정된 자료만 가지고 각 수계의 하류지점에 대해서 유량과 BOD와 COD 등 수질지표와의 상관성 분석을 하였다. 이러한 상관성 분석결과중 한강 인도교지점과 낙동강 남지(진동)지점에서의 유량과 BOD와의 관계는 각각 그림 2, 3과 같다.

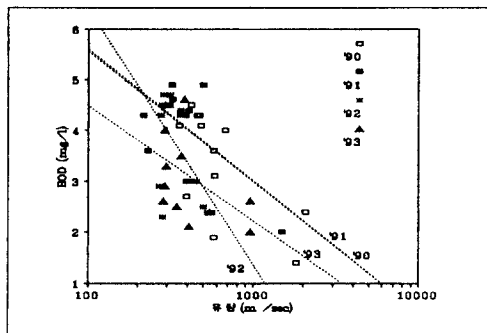


그림 2 한강 인도교지점에서의 유량과 수질(BOD)의 상관성

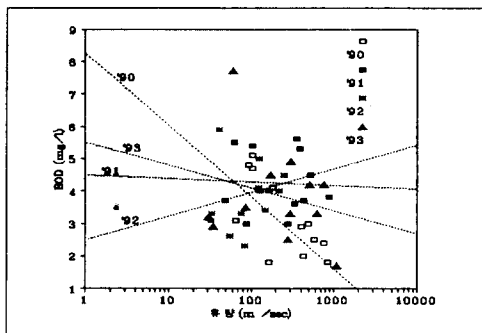


그림 3 낙동강 남지지점에서의 유량과 수질(BOD)의 상관성

이 그림들에서 보는 바와 같이, 대하천 하류지점에서의 유량과 수질(이 경우 BOD)의 상관성은 낮게 나타났다. 이러한 결과는 다른 수질항목에 대해서도 비슷하게 나타났다.

물오염도의 대표적인 척도인 BOD, COD 지표가 유량과 상관성이 낮게 나타난 것은 매우 의외의 결과이다. 이러한 결과는 본 연구의 조사지점의 유역이 커서 수질에 영향을 미치는 인자들이 많고 그 상호작용이 매우 복잡하기 때문일 것이다. 한 예를 들어, 강수에 의해 하천유량이 증가하여도 유역내 비점오염원의 유입으로 수질 농도가 크게 낮아지지 않을 수 있다. 더욱이, 하천유량이 댐에 의해 조절되는 경우 유량과 수질과의 상관성은 간단하게 나타나지 않을 것이다. 또한 하절기와 동절기에는 수중 미생물의 활동이 다르므로 같은 유량조건인 경우에도 계절에 따라 수질이 달라지게 된다.

질소와 인 또한 유량이 증가할 때 감소하기도 하고 증가하기도 하였다. pH와 대장균수는 유량과는 그다지 큰 상관관계를 보이지 않고 일정한 범위내의 값을 나타냈다.

DO와 SS는 유량과 강한 상관관계를 일관성있게 나타냈다. DO와 유량이 반비례관계를 가지는 것은 전술한 바와 같이 수온이 높은 여름철에 유량이 풍부하고, 수온이 낮은 겨울철에 유량이 적기 때문인 것으로 사료된다. SS는 유량이 증가할 때 유역에서 유입되는 토사량과 강바닥에서 떠오르는 저질이 주원인이 되어 서로 비례하는 관계를 나타낸 것으로 사료된다.

4.2 다중회귀분석

5대강의 유량과 수질인자를 각각 대응시켜 상관성을 검토한 단순회귀분석에 이어 유량과 한가지 이상의 수질인자를 연관시킨 다중회귀분석을 시도하였다. 다중회귀분석에 포함된 수질인자들은 BOD, COD, DO와 유량자료 등이다. 다중회귀분석에 사용된 통계 소프트웨어는 SYSTAT 이었으며, 다중회귀분석의 기본 방정식은 다음과 같이 주어진다(Systat Inc. 1985, Neter et al.

1983).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \varepsilon_i \quad (1)$$

본 연구에서 활용된 유량 및 수질인자의 식은 다음과 같다.

$$\ln(\text{BOD}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Q) + \beta_2 \ln(\text{COD}) + \beta_3 \ln(\text{DO}) \quad (2)$$

1990년 1월부터 1993년 12월까지 가용한 전자료를 이용하여 5대 수계의 각 2개 지점에 대하여 다중회귀분석이 수행되었다. 다음의 모형은 5대강중 대표적으로 한강의 상·하류 각지점에 대한 다중회귀분석 결과이다.

$$\begin{aligned} \text{한강 중원} : \text{BOD} &= 0.86 Q^{-0.058} \text{COD}^{-0.01} \text{DO}^{0.28} \\ r^2(\text{결정계수}) &= 0.108, n(\text{자료수}) = 48 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{인도교} : \text{BOD} &= 1.82 Q^{-0.193} \text{COD}^{0.828} \text{DO}^{0.241} \\ r^2 &= 0.769, n = 48 \end{aligned}$$

앞의 단순회귀분석의 결과와 같이 각 수질인자들과 유량간의 일관성있는 수학적 모형은 도출되지 않았다. 다중회귀분석에 대한 결정계수(r^2)는 0.02에서 0.77의 범위를 보여 일반적으로 낮은 값을 나타냈다.

다중회귀분석에 의한 모형의 결과를 통계학적으로 시험하기 위하여 상대오차를 결정하였다. 유량, COD, DO의 3개 값을 이용하여 다중회귀선에서 구한 BOD의 예측값은 그 실측값과의 상대오차가 작게는 0에서 크게는 100%까지 나타났다. 다만, 인도교와 남지(진동)지점의 예측치는 실측치와 비교적 근접하고 있다.

4.3 자기회귀(AR)모형에 의한 월별 수질 예측

하천유량과 BOD로 표시되는 수질과의 상관성 검토의 일환으로 한강 인도교지점에 대하여 자기회귀모형이 적용되었다. 자기회귀모형에서는 수질인자의 자기상관특성과 수질인자와 유량과의 상관특성이 조합되어 수질예측을 가능케 하였다. 자기회귀모형의 기본 가정은 시간에 따라 수질과 유량의 기본특성이 변하지 않는다는 통계적 정상성(stationary))을 유지한다는 것이다. 이 모형은 최근에 한국수자원공사(1993)²⁾에서 낙동강의 물금지점의 수질(BOD, COD, NH₃-N)에 대해 적용되며, BOD에 대해서 특히 양호한 결과가 나타난 바 있다. 본 연구에서 이용된 자기회귀모형의 기본식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_i = & \bar{C}_i + \rho_{(C_{i-1}, C_i)} \times \frac{S_{(C_i)}}{S_{(C_{i-1})}} \times (C_{i-1} - \bar{C}_{i-1}) \\ & + \rho_{(Q_i, C_i)} \times \frac{S_{(C_i)}}{S_{(Q_i)}} \times (Q_i - \bar{Q}_i) + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, C_i : 그달의 예측 수질 (mg/l)

\bar{C}_i : 그달의 평균 수질 (mg/l)

$\rho_{(C_{i-1}, C_i)}$: 그 전달 수질과 그달 수질간의 상관계수

$S_{(C_i)}$: 그달 수질의 표준편차

$S_{(C_{i-1})}$: 그 전달 수질의 표준편차

C_{i-1} : 그해의 전달 수질 (mg/l)

$\overline{C_{i-1}}$: 전달 수질의 평균 (mg/l)

$\rho_{(Q_i, C_i)}$: 그달의 유량과 수질간의 상관계수

$S_{(Q_i)}$: 그달 유량의 표준편차

Q_i : 그달의 유량 (m^3/sec)

$\overline{Q_i}$: 그달 유량의 평균 (m^3/sec)

ε_t : 무작위 성분

한강 인도교의 1990년 1월부터 1993년 12월까지의 월별 유량자료와 BOD 자료를 이용하여 식 (3)에 의해 자기회귀분석이 행하여졌다. 그림 4는 한강 인도교 지점에서의 월별 BOD 실측값과 자기회귀분석에 의한 BOD 예측값의 변화를 보여준다. 여기서 상대오차값은 0%에서 50%까지의 범위를 보이며 아주 양호한 예측값을 나타내었다. 결과적으로, AR모형에 의한 수질예측은 비교적 양호하게 나타났다. 추후 자료가 보완되면 다른 유역에 대해서도 이 모형을 적용할 가치가 있다고 사료된다.

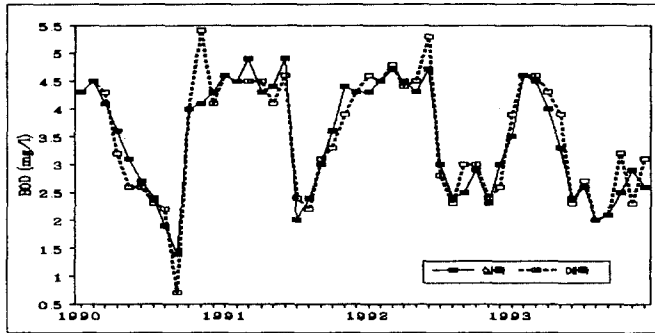


그림 4 AR분석에 의한 한강 인도교지점의 월별 BOD 상대오차

5. 결과의 검토

지금까지 1990년 1월부터 1993년 12월까지의 자료를 이용하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 등 5대 수계의 주요 지점에서 하천유량과 수질과의 상관성을 검토하였다. 본 연구에서 수집된 유량과 수질자료는 어느 정도의 불확실성을 내포하고 있다.

Pearson 상관계수를 결정하기 위하여 DO, BOD, COD, 부유물질, 대장균, 총질소, 총인의 7개 항목이 이용되었다. 5대강의 10개 지점에서 공통적으로 BOD는 COD와 비례관계를 나타냈다.

유량과 수질의 상관성 검토에서 선형-대수 (linear-log) 관계를 이용하여 단순선형회귀모형을 적용하였다. 적용된 수질지표는 pH, DO, BOD, COD, 부유물질, 대장균, 총질소, 총인 등의 8가지이다. 그 결과 pH는 모든 유역에서 유량에 대한 일정한 추세를 보이지 않았다. 다만, DO는 유량에 반비례하는 추세를 보였고, BOD는 유량이 증가할 때 그 농도가 감소하는 추세를 보였다. COD는 유량과 일관성있는 상관성을 보이지 않았고, 부유물질은 유량과 강한 비례관계를 보였다. 대장균, 총질소, 총인은 유량과의 일관성있는 상관관계를 보이지 않았다.

유량과 BOD, COD 등 수질과의 상관성은 강수효과를 제외시켜도 크게 변하거나 개선되지 않

은 것은 조사대상 유역이 넓어서 수질관련 인자들이 많고 상호작용이 복잡하다는 점 이외에도 일반적으로 강우는 하천수질에 퇴석과 비점오염원의 유입이라는 서로 상반된 효과를 주기 때문인 것으로 사료된다.

5대강의 유량과 수질인자간의 상관성 검토의 일환으로 유량, COD, DO를 이용하여 BOD를 예측하는 다중선형회귀식이 도출되었다. 그 결과 인도교지점과 남지(진동)지점에서만 결정계수가 0.64 이상으로 의미있는 결과가 나왔고, 나머지 지점들에 대해서는 큰 의미는 찾을 수 없었다.

마지막으로, 한강 인도교지점에 대해서 1990년 1월부터 1993년 12월까지의 월별 유량자료 및 BOD 자료를 이용하여 자기회귀분석이 행하여졌다. 자기회귀분석은 수질인자의 자기상관특성과 수질인자와 유량과의 상관특성을 조합하여 특정 시점의 수질 예측을 가능케 하는 도구로서 예측 대상인 수질인자는 BOD였다. BOD에 대한 한강 인도교지점에서의 자기회귀분석 결과는 상대적으로 0%에서 50%까지의 범위를 보이는 양호한 예측값을 나타내었다.

6. 결 론

본 연구에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 5대 수계 상·하류 2개 지점에서의 하천 유량과 수질 인자간의 상관성은 전혀 없거나 비교적 낮게 나타났다. 그 이유는 조사대상 유역이 넓어서 수질관련 인자들이 많고 상호작용이 복잡하다는 점 이외에도 일반적으로 강우는 하천수질에 퇴석과 비점오염원의 유입이라는 서로 상반된 효과를 주기 때문인 것으로 사료된다.
- (2) 다만, DO는 유량에 반비례하는 추세를 보였고, BOD는 유량이 증가할 때 그 농도가 감소하는 추세를 보였다. COD는 유량과 일관성있는 상관성을 보이지 않았고, 부유물질은 유량과 강한 비례관계를 보였다.
- (3) 한강 인도교지점에서의 자기회귀모형(AR)의 적용결과는 양호한 것으로 나타났으며, 이는 하천수질 예측시 이러한 통계 모형의 적용 가능성을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 1994년 건설부가 의뢰한 하천환경관리기법 개발 연구·조사 사업의 일환으로 한국건설기술연구원에서 경희대 황규대/오종민 교수팀과 광운대 최상일/이영수 교수팀에 의뢰한 결과를 토대로 작성한 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., and Lane, W.L., *Applied Modelling of Hydrologic Time Series*, W.R.P., Littleton, Colorado, 1988.
- 2) 한국수자원공사 댐운영처, *진동 유량에 따른 낙동강 주요 취수지점인 물금지점 수질예측 모델 개발*, 1993.